

Recibido: 25 / 11 / 2008, aceptado en versión final: 19 / 12 / 2008

Productividad de las máquinas tuneladoras tipo tbm vs tipo de roca

Performance of the tunnel boring machine – tbm vs rock type

Mauro Giraldo Paredez¹, Oswaldo Ortiz Sánchez¹

RESUMEN

Las máquinas tuneladoras tipo TBM son equipos de minado continuo diseñados para la excavación de túneles circulares hasta más de 15 m de diámetro actualmente. La utilización de estas máquinas en sustitución del método convencional de perforación y voladura, es cada vez más frecuente, inclusive en nuestro país, dado que desde la primera aplicación en el proyecto Carhuaquero (Chiclayo) a inicios de la década de 1980, pasaron casi 18 años para la siguiente aplicación en el proyecto Chimay (1998-1999); luego entre los años 2000-2004 en proyecto hidroeléctrico de Yuncán, se aplicaron 2 TBM (sólo un año después de la aplicación en Chimay) y actualmente en el proyecto trasvase Olmos, se viene aplicando una TBM desde el 2007. Ello demuestra sin duda, que la aplicación de las TBM es prominente en el presente siglo. Este artículo está basado en el estudio realizado en el proyecto hidroeléctrico de Yuncán, a la TBM MK 12 durante casi dos años (desde su montaje hasta su operación). En este proyecto, esta TBM trabajó con un diámetro de 4,10 m, y durante la excavación atravesó distintos tipos de rocas, predominando entre ellas la roca alterada que sumado a la gran afluencia de agua, se tuvo bajos rendimientos de esta TBM, invirtiéndose el mayor tiempo en sostenimiento de la roca, inclusive algunos días sin avance alguno.

Palabras clave: Máquina tuneladora, TBM, mordazas, cabezal, carrera, tren de apoyo, excavación, minado continuo.

ABSTRACT

The tunnel boring machines (TBM) are continuous mining equipment designed for the excavation of circular tunnels until more than 15 m of diameter at the moment. The application of these machines in substitution of the conventional drilling and blasting method, is more and more frequent, including in our country, since from the first application in the Carhuaquero project (Chiclayo) at beginnings of the decade of 1980, spent almost 18 years for the following application in the Chimay project (1998-1999); soon between years 2000-2004 in hydroelectric project of Yuncan, they were applied to 2 TBM (only a year after the application in Chimay) and at the moment in the project it trasvase Elm trees, comes applying a TBM from the 2007. It demonstrates without a doubt, that the application of the TBMs is prominent in the present century. This article is based on the study made in the hydroelectric project of Yuncan, to TBM MK 12 during almost 2 years (from its assembly to its operation). In this project, this TBM worked with a diameter of 4.10 ms, during the excavation crossed different types of rocks, predominating among them the altered rock that added to the great water affluence, had low yields of this TBM, being reversed the greater time in support of the rock, including some days without advance some.

Keywords: Tunnel boring machine, TBM, grippers, cutterhead, stroke, buckup, boring, continuous mining.

I. INTRODUCCIÓN

Las máquinas tuneladoras (tunnel boring machine, TBM) son equipos de minado continuo que se utilizan para la excavación de labores subterráneas de

gran longitud, como túneles, galerías, rampas, etc., sin usar explosivos. Estos equipos realizan simultáneamente el corte, remoción y transporte de la roca arrancada.

¹ Profesores de la EAP de Ingeniería de Minas de la UNMSM. E-mail: egiraldop@hotmail.com

El rendimiento de estas máquinas, entre otros factores, está determinado básicamente por el tipo de roca. A pesar de ello, no se tiene a disposición estudios preliminares en nuestro medio que permitan predecir su rendimiento, porque al conocer el tipo de terreno que atravesará durante su operación se puede planificar mejor el avance, los problemas logísticos, tiempo disponible, mantenimiento, disponibilidad del equipo, etc.

El presente artículo es el resultado del estudio realizado en el proyecto hidroeléctrico de Yuncán (Paucartambo II). En él se utilizaron dos máquinas tuneladoras tipo TBM, para excavar 2 de los 4 túneles de aducción. La TBM MK 12 de 4,10 m de diámetro que excavó parte de los 7009,94 m del túnel de aducción N.º 4 (N.º 4 Headrace tunnel) para conducir el agua de la presa de Huallamayo y Uchuhuerta a Penstock 1 (casa de máquinas), y la TBM Foro 900 S de 3,5 m de diámetro excavó parte del túnel de aducción N.º 1, es decir, alrededor 9995 m para travesar el agua del río Huachán (presa de Uchuhuerta) hasta el túnel de aducción N.º 2.

Para los propósitos de esta publicación, se han analizado los resultados de la excavación con la TBM MK 12. El análisis de los estudios de campo demuestra que la productividad de la TBM MK 12 estuvo seriamente afectada por el tipo de roca. En rocas buenas y autosoportantes, el avance promedio fue de 23,83 m/día, alcanzando picos superiores a 48 m/día; mientras que el promedio en terrenos suaves y deleznales fue escasamente 0,31 m/día y con bajas hasta 0,0 m/día. El mayor porcentaje del tiempo estuvo destinado al sostenimiento de roca, superando picos de 18 hrs/día (75 %) de las 24 horas del día.

2. ASPECTOS GENERALES DEL ESTUDIO

Las TBM son equipos de minado continuo que básicamente constan de dos partes: la parte fija, cuya función es sujetar a la máquina durante su operación, dentro de la que se encuentra básicamente el cuerpo, provisto de mordazas (grippers) y la pata delantera (front leg); y la parte móvil que viene a ser el conjunto que realiza el trabajo de excavación y está constituido básicamente por el cabezal (cutterhead) y la unidad de impulsión (pistones de empuje, motores de rotación, etc.).

2.1. LA MÁQUINA TUNELERA MK 12:

La máquina tuneladora TBM MK12-50-1 4.10 está diseñada para trabajar en roca dura. Su diámetro original fue de 3,90 m y con ella se excavó un túnel en Italia. Fue entregada a este país en 1993, donde llegó a excavar únicamente 600 m de túnel, su operación fue suspendida por problemas geológicos y tuvo que ser retirada del frente. Para su utilización en el proyecto

hidroeléctrico de Yuncán (Paucartambo II), el cabezal fue redimensionado por la firma Robbins en 1999, a 4,10 m de diámetro, como muestra la fotografía N.º 1. Fue traída al Perú (Lima), a inicios del 2000. El ensamble total se llevó a cabo bajo la dirección de Robbins en el pórtico de la ventana de acceso a Penstock 1 del citado proyecto. El montaje concluyó el 16/02/01, día en que se hizo la primera excavación de prueba. La operación de esta máquina estuvo afectada por una serie de factores, entre ellos, los problemas geológicos (fallas, terreno fractura y deleznable, problema de agua, etc.). Las principales especificaciones de la TBM MK 12, se detalla a continuación (Robbins, 2008):

2.2. RESEÑA DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO DE YUNCÁN (PAUCARTAMBO II).

El proyecto hidroeléctrico de Yuncán está ubicado en el distrito de Paucartambo de la provincia de Pasco. Las obras civiles de este proyecto fueron ejecutadas por la Asociación SKANSKA, COSAPI Y CHIZAKI (SKA-COCHI), encabezado por SKANSKA entre los años 2000 y 2005. La construcción de este proyecto fue para generar 130 MW de energía eléctrica. Es un proyecto típico de caída de agua del flujo de dos ríos, Huachán y Paucartambo, descargando la confluencia de éstos, en la casa de máquinas (Santa Isabel), para incrementar la generación de energía eléctrica en 3,5% a la red nacional. La excavación de los tramos largos de los túneles se hizo con 2 TBM. El túnel de aducción N.º 1, de la Ventana N.º 2 hacia la presa de Uchuhuerta, con una longitud cercana a los 9995 m, se excavó con la TBM Atlas Copco FORO 900S de 3,50 m de diámetro; y parte del túnel de aducción N.º 4 de 7009,94 m de longitud (entrando por la ventana de acceso a Penstock 1 hacia la presa de Huallamayo), se excavó con la máquina tuneladora TBM MK12 con 4,10 m de diámetro.

2.3. CLASIFICACIÓN DEL MACIZO ROCOSO.

La clasificación del macizo rocoso para los fines de la excavación y sostenimiento, el Departamento de Geología elaboró considerando tres factores: intemperismo, dureza y espaciamiento de las juntas (ver cuadro N.º 1) (Skanska, 2000). Ejemplo, para una roca ligeramente intemperizada masiva, dura y con fracturas con más de 50 cm de espaciamiento, la roca sería clasificada como "2BII". Estableció además, que la clasificación sería como: "A", "B", "CH", "CM", "CL" y "D" (ver cuadro N.º 2), siendo así, para el ejemplo anterior la clasificación correspondiente sería "B". La fotografía N.º 2 muestra el frente de excavación en roca dura y masiva, tipo "B", observándose los surcos muy superficiales descritos por los cortadores. Asimismo, la fotografía N.º 3 muestra el frente de la excavación en una roca tipo "CM", en la que se aprecian los surcos profundos y muchas veces no bien definidas.

DIÁMETRO DEL CABEZAL	4100 mm
MODELO	MK -50-1-φ 4.1
CABEZAL (ver fotografía N.º 1)	
Capacidad instalada	1000 kW
Velocidad de rotación – RPM	12,2 RPM
Tipo de cortador	Disco Robbins de 17".
Disposición de cortadores	4 CENTER, 18 FACE y 5 GAUGE (total 27)
CARRERA (stroke)	1500 mm
FIJACIÓN (Gripping)	
Fuerza máxima de fijación	18 770 kN (1 914 014,44 Kg)
Carrera del gripper	fuera: 165 mm y Dentro: 190 m
Presión específica de terreno	28,5 bar, máxima.
SISTEMA HIDRÁULICO	
Presión máxima del sist. hidráulico	345 bar (34,5 Mpa)
Máxima presión normal de trabajo	276 bar (circuito de empuje).
REMOCIÓN DE ESCOMBRO	
Transportador (conveyor)	Ancho de faja 600 mm
Velocidad de la faja transportadora	0 – 2,4 m/s, mando hidráulico
SISTEMA ELÉCTRICO	
Suministro de energía	7 200 V / 60 Hz
Circuito del motor principal	660 V, 3 fases, 60Hz
Circuitos de motores eléctricos	460 V, 60 Hz
Iluminación y tomacorrientes	120 V, 60 Hz
Sistema de control PLC	24 V DC
Transformadores	2 x 630 kVA, 6 000 V / 660 V 1 x 600 kVA, 7 200 V / 400 V
CONTROL DE POLVO	
Capacidad del limpiador	130 m ³ /min
Flujo de agua para la supresión	130 l/mim para el cabezal nominal
PESO DE LA MÁQUINA	190 Tons
Longitud de la TBM	15,30 m (incluyendo el transportador, faja N.º 1).



Fotografía N.º 1. Cabezal de la TBM MK 12 en fase final de montaje.



Fotografía N.º 2. Frente de excavación en roca dura.

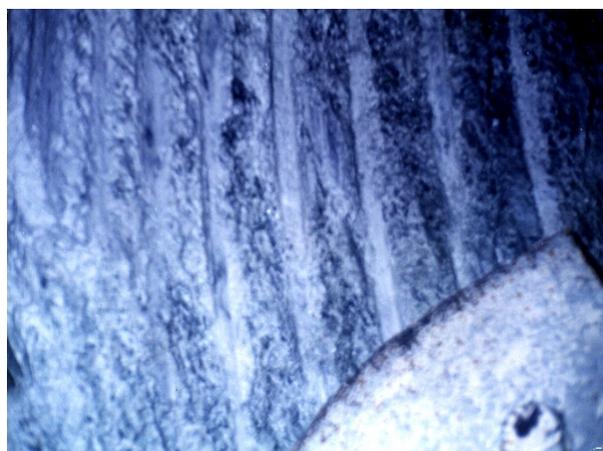
Cuadro N.º 1. Definición de los factores geológicos para la clasificación del macizo rocoso.

INTEMPERISMO		DUREZA		ESPACIAMIENTO DE JUNTURAS	
1	Roca fresca, el componente mineral no presenta meteorización.	A	Roca muy dura; se rompe en fragmentos filosos ante un fuerte golpe de martillo.	I	Más de 100 cm
2	Roca ligeramente meteorizada; algunos minerales están ligeramente meteorizadas. Algunas fisuras pueden presentarse ligeramente manchadas.	B	Roca dura, se rompe en fragmentos ante un fuerte golpe de martillo.	II	40 a 100 cm
3	Roca moderadamente intemperizada, algunos minerales están meteorizadas. Las rajaduras se presentan manchadas y el material se encuentra intemperizado.	C	Roca quebradiza; se rompe en fragmentos pequeños ante un golpe moderado de martillo.	III	20 a 40 cm
4	Roca muy intemperizada, el descoloramiento se extiende a toda la masa rocosa. Se observan partes de roca fresca parcialmente.	D	Roca muy quebradiza; se rompe fácilmente en fragmentos pequeños ante un golpe moderado de martillo. Se rompe al estrujarla con las manos, pero no se desmenuza fácilmente.	IV	5 a 20 cm
5	Roca completamente intemperizada, la mayor parte de los minerales se encuentran intemperizadas y alterados.	E	Roca suelta, es posible excavarlo con el martillo.	V	Menos de 5 cm

III. OPERACIÓN Y PRODUCTIVIDAD DE LA TBM MK 12.

3.1. ESTUDIO DE TIEMPOS Y MOVIMIENTOS.

Durante la operación de la TBM MK 12, a fin de llevar un adecuado control de las actividades y el tiempo que demanda cada una de ellas, durante una guardia y día completos, se establecieron una serie de formatos, entre ellos: Formato para el reporte del operador, formatos de reporte mecánico, formato de la actividad horaria del TBM, entre otros, a fin de llevar el control las 24 horas del día, de las actividades y el tiempo empleado. El operador reportaba las actividades cada 10 minutos, en un formato diseñado incluyendo los tiempos agrupados en operación propiamente (excavación, reinicio, etc.), back up



Fotografía N.º 3: Frente de excavación en roca suave.

(transporte de desmonte, falta de energía, etc.), y misceláneos (perforación de sondaje, sostenimiento de roca, entre otros). Asimismo, debería reportar la posición del láser en las tarjetas reticuladas (frontal y posterior), y la presión de empuje (thrust), etc. En el formato de control de la actividad global del TBM, se llevaba el control cada media hora durante las 24 horas del día (2 guardias); de tal forma que se iba compilando día a día durante todo el mes las actividades y paradas de la TBM. Se llegó a identificar al menos 50 factores de tiempo que afectaban la operación de la TBM.

Cuadro N.º 2. Clasificación del macizo rocoso.

INTEM	DUR.	ESPACIAMIENTO ENTRE JUNTURAS									
		I	I-II	II	II-III	III	III-IV	IV	IV-V	V	
1	A	A									
1-2	A - B		B								
2	B			CH							
2-3	B - C										
3	C						CM				
3-4	C - D										
4	D				CL						
4-5	D - E										
5	E									D	

3.2. ANÁLISIS DE LA PRODUCTIVIDAD DE LA MÁQUINA TUNELERA MK 12.

En esta parte se detalla todos los parámetros y factores que afectaban el rendimiento de la TBM MK

12, en el proyecto hidroeléctrico de Yuncán (Pau-cartambo II). Asimismo, se analiza la velocidad de corte, el ciclo de excavación considerando todas las actividades involucradas en su operación y especialmente su rendimiento en función del tipo de roca.

3.2.1. VELOCIDAD DE CORTE O AVANCE.

La velocidad de corte o avance se ve más afectada por los factores geológicos y de roca que por otros factores. En resumen, los avances alcanzados por día y por mes durante los meses de febrero a octubre del año 2001, donde se pueden destacar los récords alcanzados por guardia, día y mes. La mejor guardia fue la guardia de día del 25/07/01 con un avance de 32.45 m; el mejor día fue el 24/07/01 con 48,60 m; y el mejor mes fue abril de ese año con 278,05 m.

3.2.2. TIEMPO NETO DE EXCAVACIÓN.

Es el tiempo que realmente está excavando la TBM, los resultados del estudio ilustra el gráfico N.º 1. Como se ha indicado anteriormente, el rendimiento de la TBM estuvo mayormente afectado por el tipo de roca. Dentro de los análisis, se ha hecho lo propio respecto al tiempo neto de excavación, tiempo de sostenimiento de roca, velocidad de penetración, penetración por giro, presión de empuje del cabezal y el tiempo total por metro de avance. Cuanto más autosoportante fue la roca, el tiempo neto de excavación también fue mayor. Asimismo, la TBM atravesó distintos tipos de roca, desde "B" hasta "D" según la clasificación presentada en el cuadro N.º 2. Del gráfico N.º 1 se desprende que si la roca fuera tipo "A" (totalmente masiva y dura), el tiempo neto de excavación bordearía las 11 horas, que en porcentaje sería 45% de las horas nominales por día. Por el contrario, si el tipo roca fuera tipo "D" (roca suave, deleznable o muy fracturada), el tiempo neto de excavación alcanzaría tan solo 0,18 hr/día o 0,74% de las horas nominales por día, sumamente bajo.

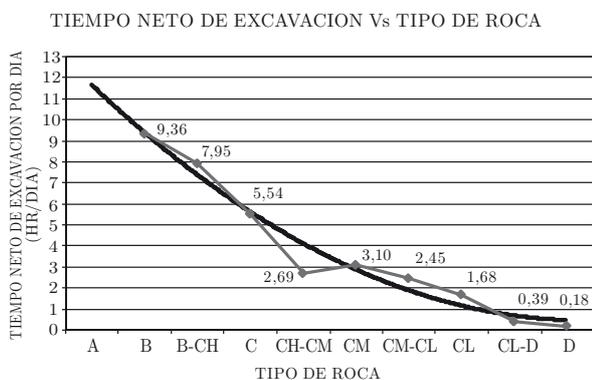


Gráfico N.º 1. Tiempo neto de excavación de la TBM MK 12 de acuerdo al tipo de roca.

3.2.3. PRODUCTIVIDAD DE LA TBM MK 12 EN FUNCIÓN DEL TIPO DE ROCA.

El gráfico N.º 2 resume el seguimiento del avance TBM MK 12, para los distintos tipos de terreno que atravesó durante los 9 meses que operó en el proyecto Yuncán. Del ábaco se concluye que si la roca fuera tipo "A", se pueden alcanzar avances promedios superiores a los a los 25 m/día; por el contrario, si el terreno fuera totalmente deleznable y suave, el avance promedio es sumamente bajísimo como 0,31 m/día.

3.2.4. TIEMPO POR SOSTENIMIENTO DE LA ROCA.

El tiempo por sostenimiento de la roca fue sumamente elevado cuando la TBM atravesaba terreno pobre, alcanzando las 18 hrs/día (75% de las horas nominales del día). En cambio en terrenos duros y competentes, este tiempo fue sumamente bajo o inexistente, tal como muestra el Gráfico N.º 3. Estos resultados confirman una vez más que los estudios geológicos y geomecánicos certeros, sirven para seleccionar una adecuada TBM, sea para roca dura, con escudo o doble escudo; dado que en terrenos deleznales y siendo la TBM descubierta se corre el

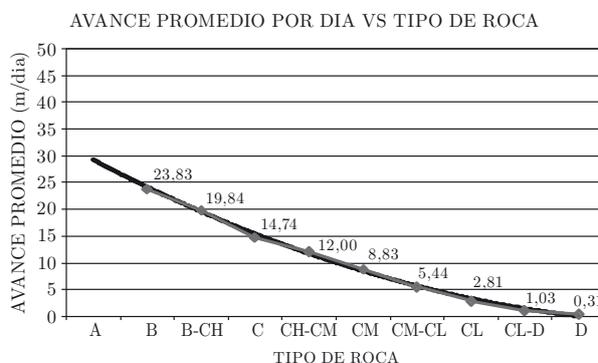


Gráfico N.º 2. Productividad promedio de la TBM MK 12 por día Vs tipo de roca.

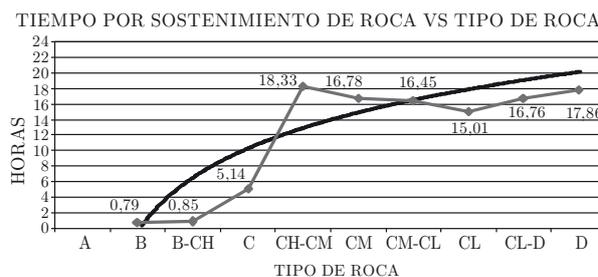


Gráfico N.º 3. Tiempo promedio por sostenimiento de roca por día (hr/día) vs. tipo de roca.

riesgo de tener un avance prácticamente nulo, afectar sus partes expuestas por colapso del terreno e inclusive sufrir un sepultamiento, como lo ocurrido con la TBM MK 12 en Yuncán en diciembre de 2001.

IV. CONCLUSIONES

1. De acuerdo a estadísticas, se observa que la aplicación de minadores continuos para la excavación de rocas en minería y construcción civil, es cada vez más predominante, respecto a la perforación y voladura, que tiene una secuela de efectos negativos producidos por las voladuras.
2. Los minadores continuos para labores subterráneas que ha tenido mayor desarrollo y aplicación, son las máquinas tuneladoras tipo TBM, con actual aplicación en distintas partes del mundo, incluyendo nuestro país en el proyecto trasvase Olmos (Lambayeque), donde el túnel de 14 km se está excavando con una TBM de viga principal (mean beam TBM) de 5,33 m de diámetro, alcanzando récords de 60 m/día de avance.
3. El factor que más afecta a la productividad de las TBM descubiertas es el tipo de roca. En rocas duras y poco fraturadas, estas máquinas alcanzan su mayor performance; pero en terrenos fracturados y deleznales, su rendimiento es sumamente bajo e inclusive cero metros por día.
4. En terrenos muy alterados, propensos al desprendimiento, el mayor porcentaje del tiempo es empleado en sostener y estabilizar el terreno, pudiendo invertirse más del 75% del tiempo nominal del día en esta labor.
5. Los resultados del presente estudio permitirán predecir la producción de las máquinas tuneladoras tipo TBM en un determinado período de tiempo conociendo el tipo de roca. Sin embargo, amerita realizar otros estudios similares, a fin de mejorar

la certeza de la productividad en función del tipo de roca.

6. El conocimiento de la productividad de las TBM en función del tipo de roca, permitirá hacer un planeamiento más certero del avance de la excavación en un período a fin de tomar las previsiones operacionales en un proyecto tunelero.

V. AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a Cía. SKANSKA por las facilidades ofrecidas durante el montaje y operación de las TBM en el proyecto hidroeléctrico de Yuncán. Asimismo, por toda la información proporcionada y las experiencias de sus ingenieros y técnicos en la excavación de otros túneles como el Eurotúnel. Análogamente, el autor agradece al Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalurgia, por permitir publicar el presente artículo en su prestigiosa revista.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Robbins (2008). *“Robbins TBM Overcomes High Overburden at Olmos”*.
- [2] Giraldo Paredez, E. Mauro (1996). *Minadores continuos a sección completa*. Post-Grado, Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú.
- [3] Colorado School of Mines (1995). *Third International Symposium on Mine Mechanization and Automation*. Golden Colorado, USA.
- [4] Earth Mechanics Institute, Colorado School of Mines (1989). *Mechanical Excavation Techniques in Mine Development and Production*. Golden Colorado, USA.
- [5] Colección de Revistas: *Mining, World Mining Equipment, Mining Magazine, Mining Journal, etc.*